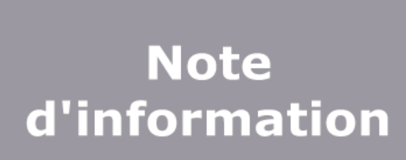


Auteur : Sétra

mars 2011

L'impact des fondants routiers sur l'environnement

Etat des connaissances et pistes d'actions

Economie
Environnement
Conception
94

Pour répondre aux nécessités de déplacements et de transports ainsi qu'aux exigences de sécurité attendues par la société sur les routes, les gestionnaires des divers réseaux se sont organisés pour assurer un certain niveau de viabilité. Ils mettent en place en hiver, différents niveaux de service en recourant à des traitements précuratifs ou curatifs à l'aide de fondants routiers comme le chlorure de sodium.

Depuis plusieurs décennies, conscient des risques environnementaux que fait peser l'usage quasi généralisé de ces produits, le réseau scientifique et technique a cherché par ses actions de formation et ses productions scientifiques, normatives et réglementaires, à sensibiliser les exploitants à la maîtrise des quantités de fondants ainsi épandues. Les réflexions récentes menées dans le cadre du « Grenelle de l'environnement » confortent les enjeux sur cette problématique. Trois axes principaux peuvent être explorés :

- définir des outils méthodologiques pour évaluer les impacts environnementaux locaux de l'usage des fondants, afin de faire prendre conscience aux exploitants et aux usagers de la route des risques encourus par les milieux naturels.
- définir des mesures techniques et opérationnelles qui permettraient de réduire l'impact des fondants routiers sur l'environnement.
- proposer un nouveau cadre réglementaire qui permettrait de créer un nouvel équilibre entre la demande de la société et la responsabilité de tous au regard du développement durable.

La présente note d'information couvre un vaste domaine, au sein duquel certaines connaissances sont encore à conforter, puis à partager avec le plus grand nombre en veillant à leur vulgarisation et leur appropriation. Le but de cette démarche est d'atteindre les meilleurs compromis entre la problématique d'exploitation des routes en hiver, ses exigences de sécurité, et la protection de l'environnement.

Sommaire



1 - Caractérisation des pressions polluantes

1.1. Qu'est-ce qu'un fondant routier ?

Un fondant* routier est un produit solide ou liquide dont les caractéristiques physiques permettent de déplacer l'équilibre des phases de l'eau pour en abaisser le point de congélation, favorisant la fusion de la pellicule résiduelle de neige après raclage ou de glace à des températures négatives.

Constituants des fondants routiers

Trois constituants peuvent être distingués dans la composition des fondants :

- **le composé chimique « principal » ou « actif »** qui, mélangé à l'eau ou à la glace, permet d'abaisser le point de congélation du mélange : Il en existe plusieurs dont le chlorure de sodium (NaCl), le chlorure de calcium ($CaCl_2$), le chlorure de magnésium ($MgCl_2$), l'urée, les fondants à base d'acétate ou formiate de sodium ou potassium ;
- **l'anti-mottant*** qui est un additif évitant la prise en masse du fondant ;
- **les insolubles et éléments traces** dont la quantité et la nature varient en fonction de l'origine du fondant (extraction minière, procédés chimiques de synthèse, évaporation etc.). Ces constituants ne contribuent pas à l'efficacité du fondant :
  - les insolubles peuvent être par exemple des carbonates, sulfates, silicates, sables ou argiles ;
  - les éléments traces sont constitués essentiellement d'éléments métalliques comme l'arsenic (As), le plomb (Pb), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le nickel (Ni), le mercure (Hg), le zinc (Zn), le fer (Fe)l'aluminium (Al), etc.

Le chlorure de sodium : le fondant le plus répandu, ...

Outre son prix, le choix d'un fondant repose sur plusieurs critères techniques dont :

- la variation d'adhérence que sa présence induit sur la chaussée ;
- le domaine de température dans lequel il reste efficace (le chlorure de calcium peut éviter la formation de glace à des températures inférieures à -25° C , ce qui n'est pas le cas du chlorure de sodium) ;
- sa corrosivité aux abords d'ouvrages sensibles (on privilégiera par exemple l'urée au chlorure de sodium (corrosif) dans ces cas là) ; etc. (*cf.* la norme XP P98-181).

Le chlorure de sodium est le fondant le plus utilisé en France et en Europe (99 % du tonnage épandu) en raison de son efficacité dans la gamme des températures d'utilisation rencontrées (0 à -22° C en laboratoire, 0 à –8° C sur le terrain) et de son prix.

Pour garantir son stockage et sa mise en œuvre par des épandeuses, celui-ci doit respecter un certain nombre de spécifications, définies dans la norme NF P 98-180 [2] : origine, fuseaux granulométriques, teneurs en chlorure, pourcentages d'eau, teneurs en anti-mottant* (hexacyanoferrate de sodium, de calcium ou de potassium), teneur en sulfates solubles.

Le chlorure de sodium, au sens de la norme NF P 98-180, ne peut être produit que par :

- l'extraction de sel gemme par abattage du minerai ;
- la cristallisation de saumure par concentration d'eau de mer, obtenue par exemple dans les marais salants.

---

* les mots ou expression marquées sous cette forme dans le texte de cette note font l'objet d'un renvoi au glossaire page 20

Il existe des différences notables dans la composition et les concentrations en éléments dits insolubles. Ces dernières sont en effet très faibles pour les sels de mer (< 1 %), alors qu'elles dépassent les 5 % pour le sel gemme et peuvent varier dans le temps suivant l'origine du produit et son fournisseur.

Pour les autres types de fondants et pour le chlorure de sodium issu d'autres processus industriels, la norme XP P98-181 [4] définit leurs propriétés fonctionnelles et encadre leurs performances.

1.2. Quelles quantités sont mises en œuvre en France ?

La quantité annuelle de fondants routiers épandue en France a varié entre 200 000 tonnes et 2 000 000 tonnes sur les vingt dernières années (*cf.* Figure 1). Elle a crû progressivement au cours des quarante dernières années avec la surface de réseau routier à traiter et reste très marquée par le caractère aléatoire de la rigueur des différents hivers. Si l'on considère d'une part le linéaire total du réseau routier français actuel, qui est estimé à 1 million de kilomètres, et d'autre part la quantité moyenne de fondants épandue par hiver, évaluée à 750 000 tonnes, on obtient le rapport de 0,75 tonne de fondants par kilomètre de réseau routier et par hiver, tous types de réseaux et toutes zones climatiques confondus. Toutefois, une analyse statistique à l'échelle régionale, dans des zones exposées, montre qu'il est possible d'épandre sur un réseau maillé des quantités comprises entre 10 et 80 tonnes par kilomètre carré et par an en relation avec les niveaux de service et les conditions climatiques.

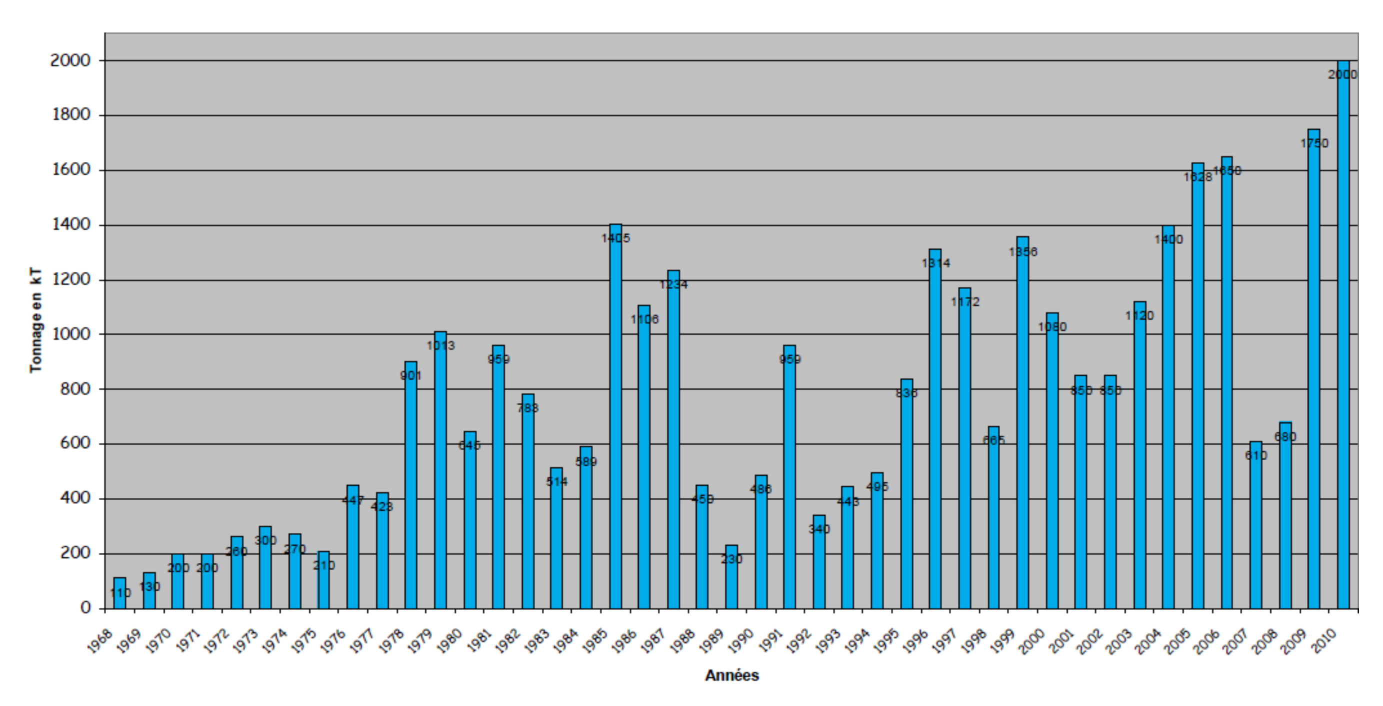


Figure 1 : estimation des ventes de fondants routiers réalisées en France sur les 40 dernières années (source : CETE de l'Est / Asselvia).

2 - Contexte réglementaire

Le **contexte réglementaire international,** en particulier dans les pays soumis à de fortes contraintes hivernales (ayant donc recours à des quantités importantes de fondant), affiche une préoccupation claire du danger potentiel que constituent les fondants routiers pour l'environnement. Par exemple, le Canada a d'abord inscrit les fondants routiers sur la liste des substances d'intérêt prioritaire, dont il fallait rapidement évaluer les effets sur l'environnement et la santé humaine. En 1999, il inscrit les fondants routiers au tableau des produits toxiques de la **loi canadienne pour la protection de l'environnement** (« les sels de voirie qui contiennent des sels inorganiques de chlorure avec ou sans sels de ferrocyanure sont considérés « toxiques » au sens de l'article 64 de la Loi Canadienne sur la Protection de l'Environnement (LCPE) 1999" **[16]**). Le Ministère des Transports Québécois travaille depuis sur les mesures à prendre pour encadrer l'usage des fondants routiers, dans l'esprit du développement durable (élaboration d'un guide de gestion). Par ailleurs, le ministère de l'Environnement du Canada a mis au point un guide [15] destiné aux gestionnaires de voiries, afin de les aider à identifier les zones vulnérables aux fondants routiers.

En Europe, de nombreux pays (Finlande, Norvège, Suède, Suisse et Allemagne) ont également inscrit la réglementation de l'usage des fondants routiers dans leur code de l'environnement. Elle se traduit, tout comme au Canada, par une optimisation des quantités à épandre et une suppression progressive des traitements dans les secteurs estimés « vulnérables».

En France, aucune réglementation ne traite spécifiquement et explicitement du cas des fondants routiers. Certaines législations, qui concernent essentiellement la préservation et la restauration des milieux ainsi que la qualité des eaux (eaux de surface, eaux souterraines et eau potable) peuvent toutefois approcher cette problématique :

- les articles L. 216-6 et L. 432-2 du **Code de l'Environnement** [52] répriment (sanction pénale) le fait de jeter, déverser ou laisser s'écouler dans les eaux superficielles, souterraines, directement ou indirectement, une ou des substances quelconques dont l'action ou les réactions entraînent, même provisoirement, des effets nuisibles sur la santé ou des dommages à la flore ou à la faune […] ou toute autre substance dont l'action ou les réactions ont détruit le poisson ou nui à sa nutrition, à sa reproduction ou à sa valeur alimentaire […] ;
- **la directive sur la responsabilité environnementale du 24 avril 2004 et sa transposition en droit français (loi n°2008-757 du 1er aout 2008)[54]** établissent un cadre commun de responsabilité en vue de prévenir et de réparer les dommages causés sur la faune, à la flore, sur les habitats naturels et sur les ressources en eau, ainsi que ceux affectant les sols. Le régime de responsabilité s'applique à certaines activités professionnelles explicitement énumérées et à d'autres activités non énumérées lorsque l'exploitant a commis une faute ou une négligence. Par ailleurs, il appartient aux autorités publiques de veiller à ce que les exploitants responsables prennent les mesures nécessaires de prévention, de réparation ou les financent ;
- **la Directive Cadre sur l'Eau (DCE), du 23 octobre 2000 [53]**, et sa transposition en droit français (loi n°2004-338 du 21 avril 2004), préconisent la gestion des eaux de surface, souterraines, de transition et côtière pour prévenir et réduire les pollutions, avec un objectif de bon état des masses d'eau d'ici 2015. **La directive fille 2006/118/CE du 12 décembre 2006** [55] prévoit le respect du bon état chimique des masses d'eaux souterraines et la définition de valeurs seuils pour une liste minimale de polluants ou de leurs indicateurs. Il est précisé que certaines valeurs seuils, en particulier celles des chlorures, devront être définies au niveau local (prise en compte du fond géochimique ou de l'influence marine). En ce qui concerne les concentrations d'eau salée dues à des activités humaines, les Etats membres peuvent décider d'établir des valeurs seuils, soit pour les sulfates et les chlorures, soit pour la conductivité, ces valeurs n'étant pas fixées à ce jour ;
- **la loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques [56]** a pour objectif de donner des outils à l'administration, aux collectivités territoriales et aux acteurs de l'eau en général pour améliorer la qualité des eaux et atteindre en 2015 les objectifs de bon état écologique fixés par la DCE. Une des applications de cette loi (décret du 29 mars 1993 modifié) prévoit une procédure de déclaration pour toutes les installations rejetant dans le milieu aquatique plus de 1 tonne de sel dissous par jour (*cf.* rubrique 2.2.4.0 de l'addendum au guide Nomenclature de la loi sur l'eau [38 et 43]). Cette démarche permet notamment de vérifier la compatibilité du projet routier avec le Schéma Directeur ou schéma d'aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE ou SAGE) et avec les objectifs de qualité des eaux (les seuils restant à fixer pour le chlorure). Suite à la procédure de déclaration, le Préfet peut également prendre des arrêtés de prescription.

  Cependant ce seuil (1tonne par jour de sel dissous) est trop élevé pour concerner l'activité de viabilité hivernale, qu'il s'agisse de l'épandage ou du stockage.

En application du **Code de la santé publique [51],** l'Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine fixe la limite de qualité suivante : 200 mg/l pour les chlorures et le sodium dans les eaux brutes destinée à la consommation humaine (à l'exclusion des eaux de source conditionnées), la limite organoleptique pour les chlorures étant fixée à 250 mg/l. Les concentrations en ions chlorures relevées dans les eaux naturelles semblent en France rarement aussi élevées que ces valeurs seuils :

- les périmètres rapprochés des captages déclarés d'utilité publique peuvent parfois faire l'objet de restrictions spécifiques relatives à la concentration en chlorure dans leur réglementation (par arrêté préfectoral).

En France, aucune réglementation n'encadre véritablement à ce jour l'usage des fondants routiers utilisés pour l'exploitation hivernale.

Une sensibilisation accrue et un cadre de gestion cohérent permettraient de minimiser les impacts environnementaux dus aux fondants routiers sans affecter la viabilité et la sécurité des réseaux routiers.

L'une des premières étapes est d'améliorer les connaissances de ces impacts sur le milieu naturel.

3 - Voies de pénétration dans l'environnement

3.1. Cycle de vie d'un fondant routier

Le cycle de vie d'un fondant routier, présenté en Figure 2, englobe toutes les activités reliées à son utilisation, de sa production à son épandage.

Dans le cycle de vie du fondant routier, les risques de contamination du milieu se rencontrent surtout dans les phases de **stockage**, de **reprise** et d'**épandage***.

Lors du **stockage**, qu'il soit intermédiaire ou final, chez le producteur/fournisseur ou chez l'utilisateur, les fondants peuvent être dispersés dans le milieu de plusieurs façons :

- dissolution par les précipitations des fondants stockés à l'air libre, ruissellement et rejet/infiltration dans le milieu ;
- lessivage des fondants tombés au sol lors des opérations de chargement et déchargement des épandeuses ;
- érosion éolienne des fondants stockés sur plate-forme et dans les véhicules ;
- dissolution des fondants résiduels lors du lavage des véhicules ayant servi au service hivernal ou vidange des cuves de dissolution lors du curage pour production de la saumure.

Les pertes sur stocks non couverts sont estimées entre 5 à 8 % auxquels il faut ajouter lors des opérations de reprise les pertes sur plate-forme de chargement soit au total une quantité estimée entre 40 000 à 70 000 t/an.

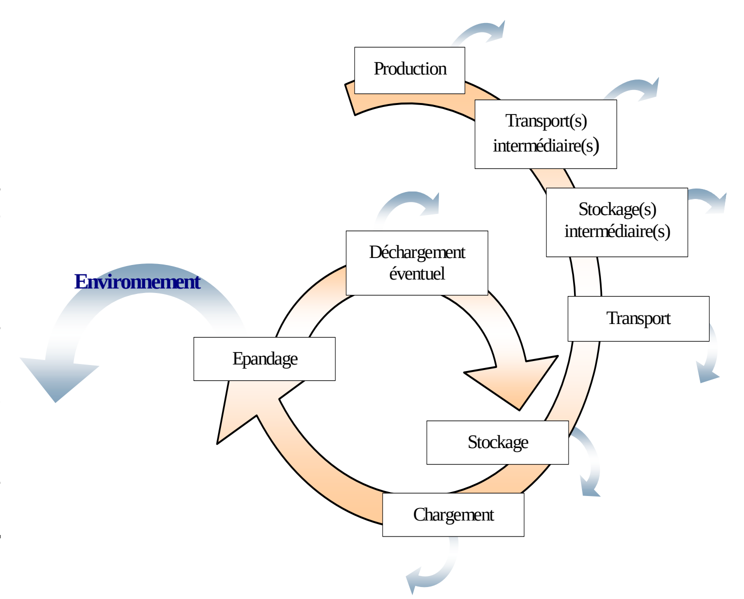


Figure 2 : schéma extrait du guide de gestion des fondants routiers [39]

Lors de l'**épandage** sur les axes routiers, les fondants vont d'abord se disperser sur la chaussée puis dans le milieu environnant à plus ou moins grande distance de l'axe de circulation ; ensuite la totalité de la quantité de fondants routiers épandue va se retrouver à plus ou moins grande échéance dans les différents compartiments (essentiellement sol et eau, mais aussi faune, flore et air) constituant l'environnement.

Les pertes de fondants routiers dans le milieu naturel, aux différentes étapes de la chaîne d'utilisation du sel constituent **une pression polluante** sur l'environnement.

3.2. Les vecteurs de dispersion pendant et après l'épandage

La migration du fondant routier s'effectue via différents vecteurs (nébulisation* - vent, ruissellement - infiltration, projections etc.) qui l'entraînent sur des distances plus ou moins importantes en dehors de la chaussée (*cf.* Figure 3). Ces distances peuvent dépendre en partie des caractéristiques du réseau routier (macro-rugosité du revêtement, profil en long et en travers de la chaussée, exposition, relief) mais également de l'état du fondant routier sur la chaussée (grain ou saumure, épaisseur de la lame d'eau).

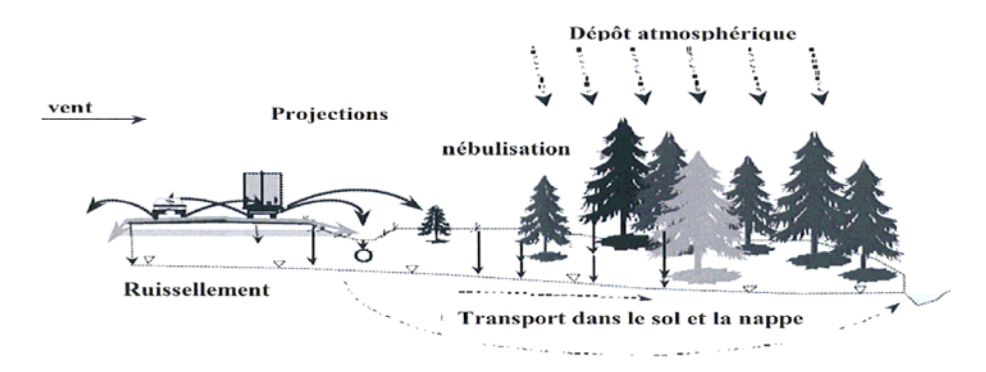


Figure 3 : schéma de la dispersion des fondants en dehors de la chaussée, traduit de Blomqvist [6]

Dépôt des fondants à proximité de la chaussée par épandage, projections et éclaboussures

Les fondants peuvent atteindre directement le bas-côté par projections depuis l'épandeuse, dans le cas d'un mauvais réglage de la largeur d'épandage par exemple, ou par projection directe due au trafic. On estime ainsi que 20 à 40 % du sel en grains atteint directement le bas-côté de la chaussée sans avoir véritablement contribué à sa protection. Le phénomène de projection ou d'éclaboussure n'atteint généralement que les premiers mètres de part et d'autre de la chaussée.

Dépôt des fondants à grande distance de la chaussée par nébulisation et/ou transport éolien :

Les fondants peuvent également atteindre le milieu naturel par nébulisation, c'est-à-dire par la projection de gouttelettes fortement concentrées en saumures entraînées par le vent ou par les turbulences provoquées par le passage des véhicules. On estime que la nébulisation peut entraîner des fondants routiers jusqu'à 400 m de la chaussée selon la configuration de la chaussée, le trafic, les vents, etc.

Cependant, plusieurs auteurs [39, 27, 26] s'accordent à dire que la quasi-totalité des fondants épandus se retrouve dans les sols jusqu'à 40 m de part et d'autre de la chaussée. La proportion déposée par nébulisation au-delà de 40m reste donc faible.

Le ruissellement : Premier mode de transfert vers le milieu naturel (via l'assainissement)

Lors de la fonte de la neige ou en cas d'événements de type pluie ou grêle, le fondant routier ruisselle gravitairement hors de la route et atteint alors les cours d'eau ou les nappes d'eau par infiltration dans le sol, en fonction de ses caractéristiques intrinsèques et de celles des terrains géologiques en présence. Le ruissellement reste le premier vecteur de transfert des fondants vers le milieu naturel en termes de flux. Cependant, dans ce dernier cas, les fondants routiers se retrouvent stockés sous forme de saumure plus ou moins concentrée dans les bassins routiers de décantation (la saturation étant rarement atteinte, ils ne précipitent pas ou peu) [47]. Compte tenu de leur solubilité, ces fondants ne sont pas retenus dans les ouvrages d'assainissement, et sont par conséquent rejetés dans le milieu naturel :

- soit directement, sans régulation ;
- soit à débit régulé afin d'assurer leur dilution dans le milieu récepteur (pour les rejets industriels, beaucoup plus concentrés, le débit de fuite des bassins tampon est généralement asservi aux débits du milieu récepteur) ;
- soit par infiltration dans le sol pour les ouvrages d'assainissement non étanches (du type bassins d'infiltration).

Le bassin d'assainissement joue un simple rôle de tampon (stockage temporaire), permettant dans certains cas de choisir la période de rejet dans le milieu naturel occasionnant le moins d'impacts sur l'écosystème aquatique (en favorisant les périodes de hautes eaux, en évitant les périodes de reproduction …).

3.3. Sous quelle forme les fondants pénètrent-ils dans l'environnement ?

Le comportement propre des ions constitutifs des fondants détermine leur devenir dans le milieu naturel.

Le composé chimique « actif » est constitué de deux types d'ions :

- ceux dont les quantités sont régulées dans le milieu naturel par des processus d'échange, de réactions, complexation*, etc. entre les différents compartiments de l'environnement (eau, sol, biomasse) ; ces ions sont dits non conservatifs ;
- Pour l'essentiel il s 'agit des ions sodium (Na^+), sulfates (SO_4^{2-}), calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}) et potassium (K^+) dont une partie sera directement retenue dans les particules du sol puis mobilisée par la végétation en présence. Leur dynamique au sein du bassin versant dépendra ensuite de leur propre dynamique dans les sols. Les cations tels que l'ion sodium Na^+ et dans une moindre mesure l'ion potassium K^+ vont s'adsorber* sur les particules négatives de sol en désorbant d'autres cations comme le calcium Ca^{2+}, ce qui ralentira leur vitesse de migration dans l'eau. Ils joueront donc un rôle dans la capacité d'échange cationique* des sols, qui est une caractéristique essentielle de la structuration d'un sol ;
- ceux qui ne subissent pas ou peu de réactions, d'échanges ou de complexation et qui vont s'accumuler progressivement dans le milieu ; ces ions sont dits conservatifs ;
- c'est le cas de l'ion chlorure : il suit sous forme soluble le cycle de l'eau sans retard et sans perte. Sa concentration dans l'eau n'est influencée, ni par les réactions chimiques, ni par les réactions biologiques. Il ne se volatilise pas, ne précipite pas facilement (les concentrations dans les eaux dépassent rarement sa limite de solubilité), ne s'accumule pas non plus sur les particules du sol et s'accumulera donc dans les zones de ralentissement ou de stockage des eaux. Par conséquent, presque tous les ions chlorures qui pénètrent dans les sols ou les eaux souterraines atteindront les eaux de surface quelques années ou décennies plus tard.

L'additif anti-mottant, l'hexacyanoferrate de sodium, de potassium ou de calcium est également très soluble dans l'eau. Sa mise en solution se fait par dissociation du cation et de l'anion ferrocyanure $[Fe(CN)_6]^{4-}$, stable et peu toxique. En solution aqueuse, ou lorsqu'ils sont exposés à la lumière, les ions complexes $[Fe(CN)6]^{4-}$ se décomposent lentement, libérant de petites quantités d'acide cyanhydrique [19]. Le caractère toxique des produits de photolyse* du ferrocyanure est atténué par de nombreux processus d'élimination ou de complexation* [16].

Les insolubles (carbonates, sulfates, silicates, etc.) et les éléments traces dans les fondants ont fait l'objet de peu d'études fournissant un retour au sujet de leur impact sur les milieux. Les seules recommandations pour limiter leur quantité concernent les fondants non couverts par la norme NF P 98-180 [2]; pour ces produits, la norme XP P98-181 [4] fixe la teneur en insolubles à 0,5 % dans l'eau pour le produit solide et 0,3 % dans l'eau pour un fondant liquide.

3.4. Mobilisation des métaux lourds par les fondants routiers

Une attention particulière doit être portée à la capacité des fondants routiers à augmenter la mobilité et la bio-disponibilité des métaux lourds présents dans les sols adjacents aux routes, qui s'ajoutent à ceux déjà présents (éléments traces) dans la composition du fondant ([10] et p. 47, p.90-91, p.104-105, p.110 [16]).

Ces métaux lourds, issus principalement de l'usure des pneumatiques, des plaquettes de freins, de la carrosserie et de la corrosion des matériaux constitutifs des équipements de la route (*cf.* note d'information n°73, Sétra [41] et Pagotto, 1999, cité dans [5]), sont en particulier le cadmium, le chrome, le cuivre, le nickel, le plomb, et le zinc. Ainsi, lorsque ces éléments sont exposés à des concentrations élevées en sodium et à des apports hydriques de faible salinité, comme c'est le cas lors de la fonte des neiges et/ou des pluies, le risque de mobilisation et de dispersion des colloïdes* est considérable [7].

Des complexes peuvent également se former entre les éléments métalliques et les ions chlorure comme c'est le cas par exemple avec le mercure (Norrström & Jacks, 1998 ; Bäckström et al., 2004, Li et al., 2009, cité dans [5]). Libérés sous cette forme dans la solution du sol, les métaux lourds (dont le mercure) sont alors rendus bio-disponibles pour les organismes vivants et s 'accumulent dans la chaîne alimentaire[13]. Toxiques ou polluants, même pour de faibles concentrations (à partir de 1mg/L le Cadmium présente par exemple une toxicité aiguë pour la truite, le mercure à partir de 2mg/L et 0,02mg/L respectivement pour les invertébrés et poissons, [22] cité dans [16]), ils font peser une menace sur l'environnement.

4 - Sensibilité* des milieux naturels aux fondants (hors impacts des métaux lourds)

Bien que la nature et l'intensité des impacts des fondants routiers n'aient rien de comparable à celles des substances issues des rejets industriels, agricoles et domestiques actuels, elles n'en demeurent pas moins réelles et préoccupantes dans certains types de milieux naturels [26].

La littérature scientifique permet aujourd'hui d'effectuer une revue intéressante des impacts directs et indirects de ces fondants sur les différentes composantes de l'environnement. Ces données sont essentiellement le fruit de recherches menées en Amérique et Europe du Nord [16], où la préoccupation environnementale est d'autant plus forte que les conditions hivernales rigoureuses conduisent à l'utilisation d'une quantité importante de fondant.

Dans ce chapitre, il est fait référence en particulier aux études pratiques, et réglementations canadiennes afin d'étendre l'état des connaissances, les recherches débutant en France dans ce domaine.

4.1. Impact sur l'eau et les écosystèmes aquatiques

Les eaux superficielles (stagnantes comme courantes) et souterraines sont affectées chimiquement par les activités de viabilité hivernale.

Les mesures de salinité des eaux de ruissellement issues des autoroutes, des neiges usées ou de lixiviat* de plate-forme de stockage de sels varient de 150 à 1 500 mg/l [29]. Cette pression polluante peut constituer une toxicité aiguë* (court terme) ou chronique* (long terme) selon la durée et la fréquence d'exposition des organismes aquatiques.

Quelques seuils pour mémoire…

Dans *Le code de Pratique de la gestion environnementale des sels de voirie* (loi canadienne) [14], il est précisé, pour les eaux de surface, qu'environ 5 % des espèces subissent des effets résultant d'une exposition chronique à une concentration de chlorure d'environ 210mg/l et que 10 % seraient touchées à une concentration d'environ 240mg/l.

Des seuils de protection y sont proposés tant pour les eaux de surface que pour les eaux souterraines ; pour une exposition à court terme à une concentration inférieure à 140mg/L de chlorure et pour une exposition à long terme à une concentration inférieure à 35mg/L aucun effet négatif sur les organismes dulcicoles* ne devrait être observé.

D'autres seuils sont recommandés pour les eaux de surface par l'*Environmental Protection Agency* (EPA) qui indique que "le biote* ne devrait pas être touché de façon inacceptable si la concentration moyenne de chlorure sur quatre jours ne dépasse pas 230mg/l plus d'une fois en moyenne tous les 3 ans" (seuil de toxicité chronique) "et si la concentration horaire moyenne n'excède pas 860mg/l plus d'une fois en moyenne tous les trois ans" (seuil de toxicité aigüe) [14].

Enfin, des études d'écotoxicité menées en laboratoire sur un certain nombre d'espèces aquatiques, ont permis d'établir, pour les organismes testés, des seuils CL_{50} de chlorure de sodium et du chlorure (*cf.* valeurs dans p. 68-70, [16]). Ces seuils (CL_{50}) correspondent à la concentration de chlorure ou chlorure de sodium qui provoque 50 % de mortalité dans la population d'organismes étudiée, pour une durée déterminée d'exposition à cette substance.

Les concentrations observées dans les eaux de ruissellement de chaussée ou issues des plates-formes de stockage (entre 150 et 1500mg/l) sont donc susceptibles, ponctuellement ou de manière persistante, de dépasser les précédents seuils et d'entraîner des effets néfastes sur les écosystèmes aquatiques.

Une tendance à l'accumulation dans les milieux aquatiques, ...

L'atteinte du biotope* se caractérise généralement par une augmentation progressive et généralisée des concentrations des éléments en présence à l'interface sédiment-eau [5]. Les mesures faites à proximité des milieux naturels où l'on a constaté des pertes de biodiversité ont révélé de fortes augmentations de concentration en chlorures liées à l'activité hivernale. Ainsi, dans les Vosges, pour des concentrations en chlorures mesurées en tête de bassin versant inférieures à 5 mg/l, les eaux du lac de Retournemer en aval présentaient une concentration en chlorures de 45 mg/l. Ce phénomène s'amplifie au cours du temps puisque, par exemple, dans le cas du Lac de Luitel [8], la concentration en sel a été multipliée par 13 entre 1955 et 1999, pour atteindre 49 mg/l en 1999.

Processus affectant les écosystèmes aquatiques :

Parmi les conséquences des activités anthropiques hivernales, deux phénomènes peuvent parfois entraîner une perte de biodiversité des écosystèmes aquatiques : la régulation osmotique* des organismes aquatiques et la stratification des eaux lacustres.Le phénomène de ***régulation osmotique*** se traduit par un flux d'eau de l'intérieur de la cellule vivante (milieu intracellulaire) vers le milieu extérieur afin de réduire les écarts de concentration ioniques entre ces deux milieux (le milieu extérieur étant plus concentré en ions en présence de fondants). Outre les ions chlorures, le sodium est l'un des ions les plus importants influençant ce processus. La déshydratation des cellules qui s'en suit peut entraîner la mort des organismes et microorganismes les plus sensibles.

En plus de ce phénomène, les fondants routiers vont également directement affecter les biocénoses* présentes avec une intensité dépendant de la pression polluante appliquée (t/km²/unité de temps), du type d'exposition provoquée (chronique ou aiguë), et de la sensibilité propre des écosystèmes récepteurs.

En effet, si les effets toxiques aigus* sur les organismes aquatiques n'apparaissent que pour des concentrations en chlorures relativement élevées, une toxicité chronique* est déjà observée pour des concentrations relativement faibles. Les valeurs de toxicité observées chez les espèces animales et végétales sont très variables entre espèces et selon leur stade de développement [29]. Cependant, des hausses relativement faibles de salinité, même à des niveaux de 200 à 300mg/l de chlorure, se situent dans l'intervalle de toxicité chronique d'un certain nombre d'organismes aquatiques [13].

Perturbation du brassage saisonnier et du renouvellement des eaux lacustres

Dans les eaux stagnantes, un autre phénomène conduit à la perte de biodiversité : naturellement, la stratification thermique de certains lacs entraîne un brassage vertical saisonnier des eaux permettant aux couches profondes (hypolimnion), plus froides et plus denses, de s'oxygéner et aux couches superficielles (épilimnion), plus chaudes, de s'enrichir en nutriments bio-disponibles pour le phytoplancton. Ces changements cycliques des propriétés abiotiques des lacs sont essentielles à la survie et à la croissance de tous les organismes de l'écosystème.

Or, ce mécanisme est perturbé par les eaux chargées en chlorure de sodium qui se concentrent dans les lacs lors de la fonte des neiges ; l'eau salée, plus dense que l'eau douce, s'écoule au fond du lac et y forme une couche. Au printemps, les différences de densité n'étant plus seulement dues à une stratification thermique, il n'y a plus de brassage saisonnier des eaux.

Les couches profondes, sans apport d'oxygène, deviennent anoxiques* tandis que les couches supérieures s'appauvrissent en nutriments :

- en surface, les organismes aquatiques ne disposant plus de nutriments, perdent en productivité ;
- en profondeur, les organismes morts s'accumulent et la matière organique, en l'absence d'oxygène, n'est plus dégradée par les bactéries. Les organismes vivants dans les sédiments disparaissent progressivement pour être remplacés par des espèces tolérantes à la salinité et à l'anoxie*.

Les écosystèmes subissent donc une modification complète ; les impacts sont très importants pour les lacs petits et profonds, présentant un faible volume d'eau [10], [9] [13, p,85] et un faible taux de renouvellement des eaux.

Facteurs aggravants : outre la proximité au réseau routier, l'augmentation de salinité des milieux affecte d'autant plus les organismes aquatiques que les eaux (souterraines ou de surface) présentent [10] :

- un faible taux de renouvellement (exemples : eaux stagnantes pour des milieux lacustres ou tourbières) ;
- un faible débit (petits ruisseaux peu profonds à faible vitesse d'écoulement) ;
- une faible capacité de dilution (nombre limité de sources d'alimentation, vastes plans d'eau, etc.).
- une faible minéralisation des eaux (les eaux minéralisées ont un pouvoir tampon plus élevé que les eaux peu minéralisées).

Pour une même quantité de sel introduite dans des masses d'eau présentant des écosystèmes similaires, les impacts sur les organismes aquatiques seront donc plus ou moins importants en fonction de ces différents facteurs.

4.1.1. La flore aquatique

L'accumulation de sels ou l'arrivée d'eaux fortement chargées en sels peuvent aboutir à la disparition de communautés végétales spécifiques des milieux peu minéralisés, au profit d'autres espèces moins sensibles aux variations de la composition des eaux et aux fluctuations de concentration en sels. Ainsi, les espèces présentant un faible spectre de tolérance* face à la salinité (certaines algues bleu-vert par exemple [10]) vont être progressivement dominées, puis disparaître pour être remplacées [8] par les espèces halophiles* ou halo-tolérantes*.

En France, l'exemple du Lac de Luitel [24 et 11] illustre bien cette problématique ; alors que la concentration en chlorures augmente dans le lac (3,7mg/L mesurés en 1955, 34mg/L en 1982 et 49mg/L en 1999) trois phénomènes traduisent les modifications profondes de la structure de l'écosystème lacustre :

- une baisse de la diversité spécifique est constatée : le nombre d'espèces composant le peuplement phytoplanctonique du lac chute de 243 en 1952 à 106 en 2002 ;
- les Desmidiées, groupe d'espèces caractéristique des lacs-tourbières oligotrophes, ne constituent plus que 12 % du peuplement d'algues en 2002, tandis qu'elles représentaient 83 % en 1952 ;
- en 2002, l'espèce *Synechocystis salina*cyanobactérie halophile* des eaux légèrement saumâtres, constitue 42 % du peuplement.

L'atteinte des communautés de phytoplancton, producteur d'oxygène et base de la chaîne alimentaire, peut laisser présager des répercussions sur les espèces situées à des niveaux supérieurs de la chaîne trophique* du lac.

4.1.2. La faune aquatique

La faune aquatique (poissons, crustacés, ...) ou celle liée à l'eau (amphibiens, mammifères) est particulièrement sensible aux fondants routiers, du fait de l'action des ions Cl^- et Na^+ sur l'équilibre osmotique* entre la cellule vivante et son environnement [16].

Si la plupart des organismes aquatiques (flore comprise) se sont adaptés et ont développé des mécanismes de contrôle de leur concentration ionique et de leur contenu en eau face à leur environnement, certaines espèces restent vulnérables face à ce stress polluant, ce qui peut engendrer des perturbations et une fragilisation des écosystèmes les plus sensibles.

Les impacts du sel sur une espèce ne doivent pas être évalués à partir de la seule réaction de son organisme à l'environnement salin, mais doit aussi être considéré à travers les perturbations qui touchent à l'ensemble de la chaîne alimentaire de cette espèce.

Invertébrés et microorganismes

Certains microorganismes comme les bactéries d'eau douce sont sensibles à de faibles variations de salinité de l'eau.

Dans un contexte de petits lacs de faible volume d'eau présentant un phénomène de stratification dû à la salinité des eaux (*cf.* ci-dessus), les organismes vivants dans les sédiments (benthos), comme les larves d'insectes ou les oligochètes*, disparaissent pour être remplacés par des espèces mieux adaptées aux conditions salines et anoxiques [10].

L'examen de la structure des communautés d'invertébrés des bassins d'eau pluviale autoroutiers montre que celle-ci est influencée par le chlorure de sodium (et peu par les polluants chimiques routiers) puisqu'une corrélation négative entre concentration en chlorure de sodium et diversité a été relevée [36].

Amphibiens (ou batraciens)

La salinité excessive de l'eau entraîne chez les amphibiens (salamandres, tritons, crapauds, grenouilles) des modifications de la glande thyroïde [12]Les disfonctionnements qui en résultent affectent les individus (réduction du poids et de l'activité, augmentation des anomalies physiques) et modifient le cycle de développement de l'espèce (taux de survie des têtards, taux de développement, de reproduction, temps de métamorphose, ...), mettant en péril la pérennité des populations.

Remarque : Des accidents de salage dus à un mauvais réglage de l'épandeuse, se sont parfois produits, entraînant un déversement de sel ou saumure directement dans les crapauducs ou batracoducs. Ces ouvrages, qui permettent la migration de ces animaux à travers les infrastructures en sécurité (en évitant la chaussée) peuvent alors se révéler mortels.

Poissons

De manière générale, les poissons d'eau douce tolèrent relativement bien des taux de salinité élevés [9] ; ils y sont moins vulnérables que les microorganismes ou invertébrés [8], moins mobiles. Dans les milieux aquatiques courants, ceux-ci peuvent effectuer des déplacements ponctuels afin d'éviter les zones à forte concentration.

Cependant, dans un contexte lacustre, une diminution de l'abondance et de la diversité des algues et de la faune benthique due à la salinisation des eaux conduit à une réduction de la quantité de nourriture disponible pour les poissons et peut donc entraîner indirectement une diminution du nombre de poissons dans le milieu (Environnement Canada, 1997 [17]).

Mammifères

Même si les effets directs des fondants routiers ne semblent pas clairement établis, ceux-ci sont identifiés comme pollution pouvant affecter (notamment par la voie de la chaîne alimentaire) certains mammifères semi-aquatiques, vulnérables aux perturbations anthropiques, tels que le Desman des pyrénées (*Galemys pyrenaicus*) [34].

4.2. Impact sur le sol et les écosystèmes terrestres

L'épandage de fondants a également des effets nocifs sur les propriétés physiques et chimiques des sols : impact sur la structure, la perméabilité, l'humidité, le gonflement, le potentiel osmotique*, le pH et la conductivité électrique [7].

Soumis à une hausse de la concentration en sodium, le sol peut subir une altération de sa structure chimique et physique et perdre en stabilité (floculation de l'argile). Par ailleurs, les cations* présents dans les fondants routiers modifient la composition chimique de la solution de sol (perte des cations basiques) et affectent directement la régulation osmotique des végétaux présents. On assiste également à des perturbations du processus de décomposition en raison d'effets indirects sur la mobilisation des particules du sol [5] et les communautés des décomposeurs* de la matière organique.

Afin d'éviter les effets néfastes (voir ci-après) résultant de l'emploi des fondants, des seuils de protection ont été proposés ; *Le code de Pratique de la gestion environnementale des sels de voirie* [Canada, 14] indique en effet que "l'intégrité des sols, la pédofaune* et la végétation seront protégées à des concentrations d'environ 60mg de Na /L et 90 mg de Cl/L".

4.2.1. La flore terrestre

Les impacts provoqués sur la végétation terrestre sont de loin les plus connus [48]. La nature et l'amplitude des impacts du sel sur la flore dépendent de la sensibilité des espèces et de la pression polluante exercée.

Processus d'action du sel sur la flore terrestre

La végétation peut se trouver agressée par le sel présent à la fois dans l'atmosphère (embruns routiers) et dans le sol ([11], [23] cité dans [10]) :

- le sol riche en chlorure de sodium est rendu moins fertile pour les végétaux et l'eau interstitielle salée (eau contenue dans les pores du sol) exerce sur le système racinaire du végétal un stress osmotique. Ce stress osmotique, se traduit par un flux d'eau des cellules végétales vers le milieu extérieur conduisant au dessèchement des tissus cellulaires.
  Par ailleurs, l'augmentation de concentration en sodium (Na+) dans le sol peut conduire pour les végétaux à l'inhibition de l'absorption du potassium (K+), ion nécessaire à la croissance végétale. De la même manière, en cas de fortes teneurs en calcium (Ca2+), le prélèvement de sodium (Na+) et potassium (K+) est compromis.
  Il est à noter que des dommages à la végétation ont été constatés pour des concentration de 16mg de Na/kg de sol et de 30mg de Cl/kg de sol (en poids sec) ;
- les particules de fondants en suspension dans l'air se déposent sur les bourgeons, les feuilles et les branches exerçant directement une pression osmotique sur les tissus. Les conifères, dont le métabolisme* est actif toute l'année, sont plus particulièrement exposés et plus vulnérables à ce type d'agression (embruns routiers en hiver [21]).

Symptômes constatés sur la flore

Intoxication à court terme

Les effets du sel peuvent être constatés à travers les cas de brûlure du feuillage issu du contact avec le sel, le dessèchement des tissus racinaires et même la mort des espèces les plus sensibles. La germination des graines peut être réduite ou retardée

et le sel peut conduire, pour les plantes ligneuses à feuilles caduques, à la mort des bourgeons floraux oufoliaires [13]. Une floraison dispersée, voire une absence de floraison du côté exposé, peut également être observée au printemps [30] et [13].

Pour les conifères sensibles aux sels (comme Pinus Strobus ou pin blanc et Pinus resinosa ou pin rouge [48]), on constate que les rameaux âgés d'un an manquent de fermeté, et font apparaître des taches blanchâtres. Ces dernières disparaissent alors que les rameaux prennent progressivement une couleur bronzée. Selon une étude nord-américaine ([45] cité dans [48]), on observe un brunissement puis une perte prématurée des aiguilles ce qui entraîne une diminution de la photosynthèse et, par conséquent, une réduction de la taille et du diamètre de l'arbre.

Les symptômes de nécrose*, chlorose*, réduction de croissance (etc.) sont très proches de ceux observés dans les cas de déficit hydrique, de sécheresse, puisque le sel perturbe le fonctionnement de l'alimentation en eau de la plante. De ce fait, il est souvent difficile de rapporter les symptômes à l'usage du sel [11].

Intoxication à long terme

Les effets du sel sont souvent immédiats mais peuvent également se prolonger au-delà de la saison de viabilité hivernale du fait des accumulations dans le sol. Le sodium a tendance à rester dans les parties basses de l'arbre, alors que le chlore migre vers les extrémités des branches puis des feuilles où il s'accumule et peut atteindre des concentrations toxiques. Ces ions sont stockés dans les parties ligneuses* pour être progressivement redistribués, entraînant un éventuel prolongement de l'intoxication. Ainsi, les végétaux sont plus sensibles aux effets directs du sel en fin d'hiver, au moment où les plantes entrent dans la phase active de leur croissance.

En présence de chlorure de sodium, les plantes deviennent également plus vulnérables aux maladies, au froid, et, dans certains cas, aux insectes dont la prolifération est favorisée par le sel et la sécheresse [10], [11].

4.2.2. La faune terrestre

Les bactéries et les vers

En ce qui concerne les impacts sur la faune, les études scientifiques démontrent la sensibilité de certaines **espèces de vers (**par exemple *Eisenia fetida***)** et la modification de l'activité **bactérienne** des sols. D'après Green *et al.*, 2007 [26], l'atteinte à ces organismes, à la base des processus de décomposition de la matière organique, a des répercussions directes sur le cycle de l'azote (*cf.* Figure 4).

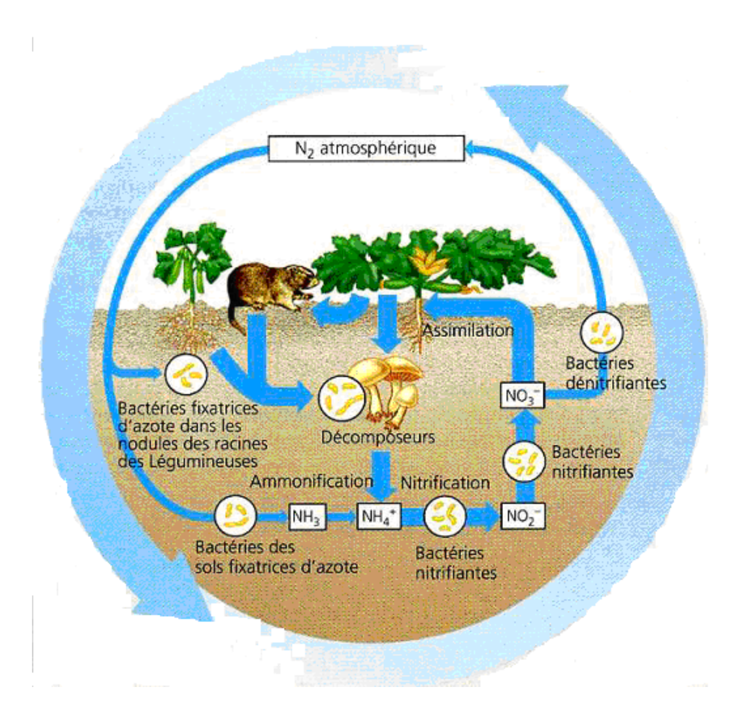


Figure 4 : cycle de l'azote (Neil CAMBELL et Jane REECE, 2007. Biologie 7e édition. PEARSON Ed. p1297)

La faune terrestre

L'augmentation de la mortalité de la **grande faune** terrestre a également été constatée, notamment par l'augmentation significative des accidents suite à une sur-fréquentation des bords de route [16] par la faune attirée par le sel. Des carences en oligo-éléments poussent parfois les animaux à compenser celles-ci par l'ingestion d'une quantité excessive de sels pouvant entraîner leur décès (LRPC Nancy, 1992 [24]).

Des irritations des muqueuses dues aux contacts avec le sel ont été également observées. Les chats et les chiens qui se lèchent les pattes après avoir couru sur la chaussée peuvent développer des inflammations des muqueuses de l'estomac s'ils ne compensent pas en s'hydratant (OCDE, 1989 [36]).

L'avifaune (oiseaux)

Selon deux études ([46] et [31] cités dans [10]) l'intoxication par le sel chez les oiseaux peut se traduire par des troubles du comportement (dépression, torticolis, rétropropulsion, paralysie partielle) et conduire parfois au coma.

Par ailleurs, différents rapports (d'après BROWNLEE *et alt.*, 2000, cité dans [16]) établissent un lien entre fondants routiers et le décès d'**oiseau**x. Compte tenu de la difficulté à retrouver les carcasses d'oiseaux morts, due à l'activité des charognards et au peu d'intérêt pour les recherches sur la mortalité de la faune en général, il semble que les décès par intoxication soient plus fréquents que ne l'indique la littérature. Un article canadien mentionne que cette mortalité touche notamment plusieurs espèces migratrices protégées par les lois fédérales canadiennes.

L'attirance des oiseaux pour le sel pourrait s'expliquer par l'utilisation des cristaux comme graviers servant à broyer les aliments et/ou par l' apport minéral complémentaire qu'ils peuvent représenter (Gionffriddo et Best, 1995 cité dans 13]).

Les impacts des fondants routiers peuvent se généraliser à l'ensemble des écosystèmes terrestres qui constituent un compartiment de stockage et de re-largage vers les écosystèmes aquatiques, ultimes récepteurs, les plus vulnérables.

Les excès de sel provoquent des perturbations à long terme sur les écosystèmes, soit directement sur les espèces, soit sur leurs milieux, ceci entraînant des modifications des communautés végétales et animales et de leur chaîne alimentaire.

5 - Pistes d'actions pour réduire les impacts

La France dispose déjà d'un ensemble d'outils techniques, méthodologiques et réglementaires permettant de réduire le risque environnemental lié à l'usage des fondants routiers.

Les mesures proposées dans les paragraphes qui suivent (*cf.* § les leviers d'action de la chaîne du sel) présentent des avantages tant sur le plan écologique que sur le plan économique :

- réduction et optimisation des quantités de fondant épandues : les pertes directes constatées dans le milieu naturel (sans que le fondant ait pu servir au déneigement de la chaussée), tout au long du cycle de vie des fondants routiers (transport, stockage, reprise, épandage) peuvent être réduites voire supprimées par des outils à disposition du gestionnaire ;
- dans un souci de gestion durable et raisonnée, il existe également des dispositions qui visent à réduire l'empreinte écologique du fondant en privilégiant certaines méthodes de production et en optimisant la distance et le moyen de transport utilisé depuis le lieu d'approvisionnement.

Cet objectif de réduction des impacts doit par ailleurs être alimenté par des travaux de recherche et l'emploi de nouvelles technologies développées en association avec les gestionnaires.

Des méthodes alternatives permettant d'éviter le recours aux fondants pourraient ainsi être envisagées telles que le chauffage des chaussées par utilisation de résistance chauffantes, de circulations d'eaux usées, de la géothermie (pratiquée au Japon) ou la mise en oeuvre de système de changement de phase dans la structure de chaussées pour éviter les températures de surfaces négatives (solution étudiée dans le cadre du programme Mateop du LCPC).

En complément de ces actions, des connaissances doivent être acquises afin d'évaluer les impacts dus à l'usage du chlorure de sodium sur le milieu naturel ainsi que l'impact environnemental des méthodes et produits alternatifs à ce fondant. Cette

démarche permettra à terme de hiérarchiser, preuves à l'appui, les produits ou méthodes en fonction de leur empreinte écologique.

Une meilleure connaissance de la sensibilité des milieux aux fondants permet par ailleurs ***d'adapter les mesures de protection et de gestion aux enjeux environnementaux et patrimoniaux*** (*cf.* paragraphe 5.1).

5.1. Développement d'une stratégie de gestion en fonction de la sensibilité des milieux

Sur les traces des pays nordiques, des démarches ont débuté en France sur l'évaluation des impacts des fondants routiers sur l'environnement dans l'objectif de **créer un outil** méthodologique. Cet outil permettrait aux gestionnaires routiers, d'une part, d'identifier, de localiser et d'évaluer les zones à risque et ainsi prendre conscience des dangers potentiels de son activité hivernale pour l'environnement, d'autre part, d' identifier des stratégies à mettre en œuvre pour réduire les impacts dans les zones présentant une forte vulnérabilité* aux fondants routiers [28]. L'idée est basée sur un concept simple qui viserait à limiter la pression en fonction de la tolérance du milieu naturel, cette dernière étant évaluée grâce à la mise en place d'un modèle Pression/Etat/Impact.

L'exemple développé par *Environnement Canada* [16] consiste à mettre en place un guide d'identification des zones sensibles [49] permettant aux gestionnaires, que ce soit pour le stockage ou l'épandage, de hiérarchiser la sensibilité du milieu naturel par un système de notation, identifiant ainsi les zones dans lesquelles une gestion raisonnée des fondants s'impose. La poursuite prochaine du travail en France permettra de définir la démarche qui sera adoptée.

Des éléments d'évaluation environnementale pourraient être inclus au Dossier d'Organisation de la Viabilité Hivernale et proposés dans les bilans effectués après chaque campagne hivernale en complément du bilan financier.

Pour toutes ces démarches, les gestionnaires sont invités à se rapprocher des organisations ou associations locales qui ont en charge la préservation de l'eau et des milieux naturels [2]. En effet, ces acteurs locaux (Agences de l'eau, DREAL, ONEMA, associations, …) ont des réseaux de suivi de la qualité des eaux et sont en mesure d'apporter une aide précieuse, notamment dans la réalisation de mesures complémentaires sur ces aspects (chlorures, conductivité, …).

Les actions et réflexions doivent s'effectuer en ne perdant pas de vue l'objectif premier du salage, à savoir la sécurité des usagers. D'autres impacts du sel non négligeables sont également à mettre dans la balance notamment sur l'ouvrage routier en tant que tel, les dégradations aux ouvrages d'art et la corrosion des véhicules.

En France, trois approches peuvent être envisagées, en plus des approches traditionnelles, visant à réduire les quantités épandues (formation des personnels, étalonnage des Engins de Service Hivernal, amélioration des consignes de traitement et de prise de décision, etc.) :

- réfléchir à des stratégies d'amélioration du réseau routier (système d'assainissement [47, 25] permettant un rejet différé sur une période plus propice, choix du revêtement, ...) ;
- développer le modèle Pression-Etat-Impact afin de hiérarchiser et évaluer les zones les plus vulnérables, et améliorer la connaissance des niveaux d'accumulation des éléments constituant les fondants routiers dans chaque compartiment : eaux de surface, eaux souterraines, sol, faune et flore ;
- proposer des stratégies de diminution des niveaux de service dans les zones les plus vulnérables en les accompagnant d'opérations de communication à l'usager.

5.2. Les leviers d'actions de la chaîne du sel

L'achat des fondants

Dans un premier temps, lors **de l'achat des fondants**, le code des marchés publics autorise la prise en compte des objectifs de développement durable dans l'achat public. Le guide d'achat des fondants routiers [40] conseille à l'acheteur des démarches d'éco-responsabilité concernant 3 volets :

- la *production* des fondants, c'est-à-dire l'énergie consommée et la production de gaz à effet de serre liées au procédé de production ; il est à noter par exemple que la production de sel de mer est moins émissive en gaz à effet de serre par

[2] Pour information, l'Atelier Technique des Espaces Naturels (ATEN) référence l'ensemble des outils juridiques pour la protection des espaces naturels (voir site http://bibliothequeenligne.espaces-naturels.fr/outilsjuridiques/)

rapport à celle du sel gemme (production à partir d'énergie solaire et éolienne) et que l'utilisation de cette ressource minérale renouvelable contribue à la préservation des zones humides*[44] ;

- le choix d'une *qualité de fondant*, car une définition adaptée des spécifications du produit aux besoins et au contexte est un gage d'efficacité économique et écologique (efficacité des traitements - limitation des quantités épandues et du nombre d'interventions, etc.) 42]. La mise en place d'une politique de qualité des fondants avec les normes NF P 98-180 [2] et XP P98-181 [4]permet de mieux maîtriser la qualité des fondants et donc une utilisation raisonnée ;
- le *transport* entre le(s) site(s) de production et le(s) lieu(x) de livraison final(aux). Sur ce dernier point en particulier, le guide d'achat [40] invitera l'acheteur à optimiser ses stockages (capacité et distribution pour diminuer les distances parcourues) et à favoriser des modes d'approvisionnement plus doux (voie d'eau, ferroutage, ...).

La prise en compte de critères environnementaux pour le jugement des offres a été intégrée au Code des marchés publics ; l'impact sur l'environnement dû au choix d'un fournisseur et d'un type de fondant (émission de gaz à effet de serre, consommation d'énergies etc.) peut donc être évalué en tenant compte de l'ensemble des trois critères ci-dessus.

L'utilisation de traitements alternatifs permettant de réduire les impacts sur les milieux est également une voie explorée actuellement, notamment en remplaçant le chlorure de sodium par d'autres fondants, voire dans certains cas par des abrasifs (sable, pouzzolane, ...). Il est à noter que les impacts environnementaux découlant de l'emploi des abrasifs ne sont pas nécessairement de plus faible ampleur que ceux résultant de l'utilisation de chlorure de sodium [46]. D'une manière générale, les connaissances sur l'impact environnemental de ces méthodes et produits alternatifs restent encore à développer.

Dans le cadre de l'évaluation de ces nouveaux produits, il importe de bien mesurer les effets sur l'ensemble du système environnemental mais aussi sur la route et les ouvrages associés. Le prix d'utilisation de certains de ces produits est souvent rédhibitoire, mais peut se justifier dans certains domaines d'emploi (ouvrage d'art, zone sensible, ...).

Le Tableau 1 ci-dessous fournit, de manière non exhaustive, quelques impacts connus *sur l'environnement* des traitements alternatifs les plus courants.

Fondant	Caractéristiques ne portant pas atteinte à l'environnement	Impacts négatifs sur l'environnement du fondant	Commentaires
Chlorure de calcium - $CaCl_2$	Le calcium n'a pas d'effet dispersant sur les sols contrairement au sodium.	Toxicité des ions chlorures (contamination des nappes etc.) quantité double de chlorure par rapport au chlorure de sodium	Coût élevé par rapport au chlorure de sodium (NaCl) Efficace à des températures inférieures au chlorure de sodium Sa toxicité serait plus importante que celle du chlorure de sodium pour les planctons et invertébrés, et moins importante pour les poissons [18].
Chlorure de magnésium - $MgCl_2$	Le magnésium n'a pas d'effet dispersant sur les sols contrairement au sodium.	Impacts importants (toxicité des ions chlorures) du fait de la nécessité d'employer une quantité double de chlorure de magnésium pour atteindre une efficacité similaire au chlorure de calcium.	Des études de laboratoire [18] mettent en évidence que le chlorure de magnésium est plus toxique que le chlorure de sodium pour les espèces aquatiques testées.
Chlorure de potassium - KCl		Dommages à certaines plantes constatés	Inefficace à des températures inférieures à -4 à -7° C Des études de laboratoire [18] mettent en évidence que le chlorure de potassium est plus toxique que le chlorure de sodium pour les espèces aquatiques testées.
Fondants à bas d'acétate – $C_2H_3O_2^-$	Biodégradable (en CO2 et eau) pour une demande en oxygène minimale L'acétate de calcium magnésium (CMA) crée moins de dommages sur la flore et le sol que le chlorure de sodium	Le CMA a des effets a priori plus néfastes sur le phytoplancton, les invertébrés et les poissons que le chlorure de sodium.	Le coût de ce fondant est (environ 20 fois) supérieur au coût du chlorure de sodium.
Fondants à bas de formiate – $CH_2O_2^-$	La biodégradation de l'ion formiate s'effectuerait plus rapidement que pour l'ion acétate	Impacts similaires à l'ion acétate	
Urée – $CO(NH_2)_2$	Faible corrosivité	Sous certaines conditions, laisse une pellicule glissante sur la chaussée. Provoque des dommages à la végétation, favorise la croissance des algues et l'eutrophisation* des cours d'eau	Efficacité jusqu'à –3 à –4° C . Coût très élevé par rapport au chlorure de sodium Nécessité de prendre des précautions pour limiter le ruissellement vers les masses d'eau
Fondants à bas de sulfates / nitrates		Néfastes pour les bétons et pierres poreuses, Présentent des risques de pollution importants pour les eaux de surface (azote inorganique) Très corrosif	
Alcools et glycols	Non corrosif	Substances non autorisées dans les lacs et les rivières. Biodégradation très consommatrice en oxygène.	
Abrasifs		Présence de polluants dans certains abrasifs de type scories ou granulés Génèrent de fines poussières pouvant pénétrer les voies respiratoires et provoquer une pneumoconiose *	Préférer les gravillons en pierre naturelle Problème de recyclage et coût de la récupération, du nettoyage et du recyclage à prendre en compte.

Tableau 1 : quelques caractéristiques et impacts de fondants et de traitements alternatifs (d'après [48])

Il existe actuellement sur le marché de nombreux fondants dont la composition chimique exacte est gardée secrète . Il est donc difficile de juger de l'innocuité de ces produits.

Les fondants issus de co-produits ou sous-produits industriels (par exemple le chlorure de sodium et le chlorure de calcium issus de boues de lavage des fumées d'incinération des ordures ménagères) doivent faire l'objet d'études avant d'être épandus sur les routes en application du principe de précaution [48].

Le transport

Comme développé précédemment, il est possible d'intégrer des critères environnementaux dans le choix des offres d'un marché public ; le pouvoir adjudicateur peut donc exiger un bilan des émissions de carbone liées au transport du sel dans le dossier de consultation (cahier des charges). Ceci peut permettre de sélectionner des modes de transports moins émissifs en gaz à effets de serre et de réduire les distances par rapport aux lieux d'approvisionnement (stocks compris) [44].

Au niveau du **transport**, le gestionnaire peut également exiger, dans le cahier des charges d'achat du fondant ainsi qu'en interne pour toute intervention de service hivernal, que les camions soient bâchés. En effet, si les fondants ne sont pas soumis à la réglementation sur les produits pulvérulents, il paraît essentiel de minimiser les pertes éoliennes durant le transport en bâchant les camions. Cette mesure est déjà préconisée dans divers pays européens.

Le stockage : localisation, conception et gestion

Concernant les **pertes sur stocks,** une amélioration des modalités de stockage (stock abrité, plate-forme, etc.) constitue la première étape dans une démarche de réduction des impacts des fondants sur l'environnement. En effet, différentes études ont montré que les rejets dans le milieu pouvaient être importants à proximité des zones de stockage. Une enquête sur les modalités de stockage des fondants routiers en France réalisée en 1999 [17] a montré que sur un échantillonnage de 1 600 stocks, 45 % d'entre eux étaient exposés aux intempéries. Quant au rejet des eaux de ruissellement de ces stocks et des plates-formes, celui-ci se faisait pour plus de 50 % directement dans le milieu naturel [18].

D'autres études ont mis en évidence que la perte sur stock sur les plates-formes de chargement est fonction de la taille et de la forme du stock (plus la surface en contact avec les précipitations est importante plus la possibilité de dissolution sera importante) et de la quantité de précipitations. De plus, des pertes supplémentaires peuvent être liées aux problèmes d'écoulement du sel dans le système de dispersion lors de l'épandage lorsque le fondant est trop humide ou a pris partiellement en masse.

Les pistes étudiées pour réduire l'impact des stocks sur l'environnement sont à ce jour les suivantes :

- la mise sous abri des produits ;
- la création de plates-formes étanches dans le but de collecter les eaux de dissolution et d'étudier soit des solutions de valorisation de ces saumures insuffisamment concentrées dans les cuves de dissolution pour la bouillie de sel, soit des déversements raisonnés dans le milieu naturel ;
- le choix de la localisation des stocks pour favoriser les environnements faiblement sensibles aux fondants routiers.

Une démarche globale peut être menée sur le stockage car, outre l'aspect de l'impact direct des fondants sur l'environnement, tous les aspects liés à la localisation optimale des stocks par rapport aux circuits de salage/déneigement doivent être intégrés pour une démarche durable (réduction des consommations en énergie fossile, réduction des émissions en gaz à effet de serre, ...), et ce dans le but de minimiser les kilomètres parcourus par les engins du service hivernal. Sachant qu'une saleuse consomme en moyenne 50 L/100 km de carburant, et que la dépense énergétique liée aux interventions de salage/déneigement est de l'ordre de 50 % des dépenses énergétiques totales liées à l'activité d'exploitation hivernale [33], il est indispensable de réfléchir à la minimisation des kilomètres parcourus.

L'épandage

Concernant **l'épandage**, la problématique est plus complexe puisqu'il s'agit de trouver le bon compromis entre contraintes d'exploitation, sécurité routière et protection de l'environnement. Depuis plus de 20 ans, des actions d'amélioration des pratiques sont menées par les correspondants du Réseau Technique Viabilité Hivernale du ministère du développement durable (formations et réunions d'information [29], production de notes d'information [42], rapports [27, 26,5, 20, 32], guides techniques [39, 38, 40], fiches techniques [37] et normes [2 et 4]) et les gestionnaires. On peut notamment citer :

- les campagnes de formation des exploitants de la route sur les enjeux d'un salage plus adapté (« *Salez moins, Salez mieux* » ou « *Verglas mode d'emploi »)*, en améliorant le processus de décision d'intervention ;
- l'adaptation des traitements aux phénomènes météoroutiers rencontrés (abandon progressif des traitements préventifs au profit des traitements dits « pré-curatifs », raclage de la neige sans épandage systématique, réduction des dosages épandus, etc.) ;
- l'adaptation du type de fondantépandu (développement de la saumure et de la bouillie de sel) ;
- amélioration du réglage des épandeuses par la conception de matériels spécifiques (DORSA) et de méthodes de réglage normalisées (NF P98-797 [3],NF EN 15597-1 - annexe A [1]) ;
- les travaux de recherches sur la distribution transversale des fondants routiers ;
- la modélisation de la salinité résiduelle en fondant sur une chaussée ;
- la détection par un système de capteur optique, sans contact et en dynamique, de la présence de glace et mesure de la concentration des fondants résiduels sur la chaussée (projet CORFOR). Cet outil pourrait permettre d'adapter la quantité de fondant à répandre en fonction des teneurs résiduelles sur la chaussée, en particulier lors d'épisodes neigeux successifs.

Le rejet dans l'environnement via l'assainissement

Le respect de valeurs limites pour les concentrations en chlorures est nécessaire pour atteindre le bon état des masses d'eau (DCE) et assurer les usages (agro-alimentaires, irrigation, etc.) de la ressource :

Utilisation de la ressource

Le système antérieur d'évaluation de la qualité de l'eau (SEQ de 1998) fournit des seuils de chlorure à respecter en fonction de l'usage de l'eau :

- pour la fonction « biologique », aucune valeur-seuil n'avait été préconisée ;
- -pour la production de l'eau potable le seuil à ne pas dépasser était fixée à 250 mg/l de chlorures ;
- pour l'irrigation, les valeurs maximales étaient de 700 mg/l de chlorures.

Il existe d'autres seuils en chlorures pour les différents usages de la ressource en eau (agro-alimentaires, etc.) ; ceux ci-ne sont pas fixés réglementairement mais sont recommandés par les corps de métiers qui utilisent cette ressource. Ils permettent d'éviter par exemple la corrosion des matériels (c'est par exemple le cas des brasseurs de bière).

Bon état des masses d'eau

L'arrêté du 25 janvier 2010 [50] pris pour l'application de la DCE n'a pas fixé de valeur limite, définissant le bon état d'une masse d'eau, concernant le critère de salinité. Ce seuil devra être fixé dans le cadre de l'application de la Directive Cadre Eau [55].

Ces valeurs limites, définies pour l'usage de la ressource et l'atteinte du "bon état" au sens de la DCE, constituent des ***objectifs minimums*** à atteindre pour les masses d'eau.

À cette fin, les eaux de ruissellement issues des plate-formes routières ou plate-formes de stockage doivent donc de préférence être recueillies par un système d'assainissement permettant leur **dilution avant rejet** dans le milieu.

De manière à limiter les impacts sur les écosystèmes, il est fortement recommandé d'effectuer le rejet des eaux salées :

- *Comment ?* à un débit contrôlé (au niveau des bassins de décantation) et asservi au débit du cours d'eau dans lequel est effectué le rejet ;
- *Où ?* dans des cours d'eau présentant les débits, les taux de renouvellement ou la capacité de dilution (grands volumes d'eau et nombreuses sources d'apport) les plus élevés ;
- Q*uand ?* durant les périodes de Hautes Eaux et en dehors de la période de reproduction (frai des poissons).

Conclusion

La présente note d’information, adressée aux maîtres d’ouvrage et aux gestionnaires routiers, dresse un premier état des connaissances actuelles sur les impacts des fondants sur l’environnement ; l’utilisation de ces produits peut porter atteinte, parfois de manière irréversible, à certains milieux aquatiques et terrestres ainsi qu’aux écosystèmes qui leur sont associés.

Le souci de préservation de l’environnement conduit à rechercher des méthodes et produits alternatifs au chlorure de sodium. Cependant, un retour d’expériences de l’impact de chacune de ces solutions alternatives doit être effectué afin de statuer sur la solution qui présente effectivement l’empreinte écologique la plus faible.

Dans l’attente de ces résultats, les impacts des fondants doivent être réduits ; dans ce but, les modalités de gestion de la viabilité hivernale doivent davantage intégrer les enjeux environnementaux et en particulier tenir compte de la vulnérabilité des milieux ; la note fournit quelques leviers et pistes d’actions, visant à une utilisation plus raisonnée des fondants routiers, et permettant de réduire l’empreinte écologique liée aux activités de viabilité hivernale.

Dans les perspectives ouvertes par le Grenelle de l’environnement, cette synthèse des connaissances constitue une première étape en vue d’établir des outils et méthodologies pour maîtriser le double enjeu de la sécurité des usagers de la route et de la préservation de l’environnement.

Glossaire

Adsorption	:	rétention de molécules libres à la surface d'un corps
Anoxie	:	Absence d'oxygène (*anoxique : sans oxygène*)
Anti-mottant	:	ce constituant chimique est un additif qui évite toute prise en masse du fondant par micro-cristallisation entre les grains. Il augmente ainsi l'efficacité du fondant
Biocénose	:	ensembles des espèces d'un même milieu
Biote	:	désigne généralement l'ensemble des êtres vivants présents dans un milieu donné
Biotope	:	milieu de vie d'une ou plusieurs espèces (synonyme d'habitat)
Capacité d'échange cationique	:	capacité maximale de cations échangeables qu'un sol peut retenir à un ph donné
Cations	:	molécule ou atome (ayant perdu un ou plusieurs électrons) dont la charge globale est positive
Chlorose	:	décoloration des feuilles due à un manque de chlorophylle qui permet la photosynthèse et qui donne aux feuilles leur couleur verte
Colloïde	:	substance dissoute dans un mélange sous la forme de particules de très petit diamètre appelées micelles
Complexation	:	capacité de groupements fonctionnels (-COOH, -OH, ...) de constituants du substrat à former des complexes (ou ensembles) avec des cations
Décomposeurs	:	organismes vivants (lombrics, insectes, mollusques, ...) et microorganismes (bactéries, champignons levures) du sol ou des eaux dont le rôle est de transformer (minéralisation) la matière organique morte (nécromasse)
DREAL	:	Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
Dulcicole	:	qui vit en eau douce
Écosystème	:	ensemble de communautés biologiques qui se partagent un milieu physique
Épandage	:	action d'épandre (le fondant) avec régularité
Équilibre osmotique	:	l'équilibre osmotique est atteint si la concentration en particules situées de chaque côté d'une membrane (cellulaire par exemple) est identique, quelle que soit la charge de ces particules. Si ce n'est pas le cas, des mouvements d'eau se produiront jusqu'à atteinte cet équilibre ; il s'agit alors d'une régulation osmotique
Eutrophisation	:	phénomène d'enrichissement des eaux continentales ou littorales en sels minéraux nutritifs (phosphates, nitrates, etc.) résultant de causes naturelles ou anthropiques.Il se caractérise par une prolifération d'algues et de plantes supérieures aquatiques qui conduit à une désoxygénation des couches profondes des eaux lacustres. Il accélère par le dépôt de matières végétales mortes dans les sédiments, le comblement lié au viellissement des écosystèmes présents dans les eaux calmes à renouvellement lent
Fondant routier	:	produit solide ou liquide dont les caractéristiques physiques permettent (par mélange) de déplacer l'équilibre des phases de l'eau pour en abaisser le point de congélation, favorisant la fusion de la pellicule résiduelle de neige après raclage ou de glace à des températures négatives
Halophile	:	organisme qui a un besoin absolu de fortes concentrations en sel pour vivre
Halo-tolérant	:	organisme capable de s'adapter à de très fortes concentrations en sel
Ligneuse	:	plante qui fabrique de la lignine, molécule donnant à la plante sa solidité (bois)
Lixiviat	:	liquide résiduel issu de la percolation de l'eau dans un matériau
Nébulisation	:	action de projeter (par passage des véhicules) dans l'air une substance (fondants) en fines gouttelettes
Nécrose	:	mort et décomposition des tissus dans une zone précise, en dehors de laquelle les tissus sont sains
Oligochètes	:	sous-classe des annélides composée de vers annelés
Oligotrophe	:	milieux d'eaux douces, pauvres en éléments minéraux nutritifs
ONEMA	:	Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques
Pédofaune	:	Faune du sol
Photolyse	:	dégradation par la lumière
Phytoplancton	:	plancton végétal ; ensemble des petits organismes vivants dans les eaux douces, saumâtres et salées, le plus souvent en suspension dans les eaux
Pneumoconiose	:	maladie pulmonaire due à l'inhalation de poussières et de particules solides

Régulation osmotique	:	processus qui assure la régulation des concentrations en soluté et l'équilibre hydrique entre deux milieux (voir la définition d'équilibre osmotique)
Sensibilité	:	état propre du système à être plus ou moins facilement dégradé sous l'effet d'une arrivée de polluant en son sein
Toxicité aiguë	:	dose unique et massive de toxique qui risque à 50 % de tuer un être vivant
Toxicité chronique	:	résultat de l'exposition prolongée à plus ou moins faible dose à un toxique dont les effets néfastes ne se feront sentir que quelques mois à quelques années plus tard
Trophique (chaîne)	:	alimentaire (chaîne)
Vulnérabilité	:	propriété d'un milieu à être atteint par un polluant
Zones humides	:	selon le code de l'environnement, ce sont des « terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire; la végétation, quand elle existe, y est dominée par des plantes hygrophiles pendant au moins une partie de l'année »

Bibliographie

Références normatives

[1] NF EN 15597-1 - Équipement de viabilité hivernale - Épandeuses - Partie 1 : exigences générales et définitions relatives aux épandeuses

[2] NF P98-180,. Chlorure de sodium solide utilisé comme fondant routier - Service hivernal - Spécifications, juillet 2003.

[3] NF P98-797 - Matériels et produits pour l'entretien routier - Épandeuse de fondants routiers - Méthode d'essais à poste fixe de la mesure du débit

[4] XP P98-181. Matériel et produits d'entretien routier - fondants solides ou liquides pour le service hivernal des routes et voiries d'usage spécifiques - Critères de performances. février 2009

Rapports / guides / publications

[5] ARCE J., LAUSECKER P.O., MAUDUIT C.. Utilisation du modèle Pression-Etat-Impact et des traits bio-écologiques des communautés macrobentiques pour l'évaluation de l'impact des fondants routiers dans les Vosges. *Rapport LRPC Nancy pour le compte du SETRA* – Dossier 200964032. 2009

[6] BLOMQVIST G., 2001. Deicing salt and roadsite environment. KTH Kungliga tekniska högskolan.

[7] BOMMEL-ORSINI A., TERNISIEN J., DUBE J-S.,. Impacts des sels de voiries sur la mobilité des métaux dans le sol de remblais urbains contaminés. *Actes du colloque AIPCR* - Québec 8-11 mars 2010.

[8] BONNEFON-CRAPONNE E., MANNEVILLE O.. Etude de l'impact de la pollution des sels de déneigement sur la Tourbière du lac de Luitel. *Rapport Réserve Naturelle de Luitel*. 2002.

[9] CCME (Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement). *Recommandations pour la qualité des eaux au Canada*, Environnement Canada, Ottawa (Ontario). 1991.

[10] CHARBONNEAU., P. Sels de voirie : une utilisation nécessaire, mais lourde de conséquences. Le Naturaliste Canadien, vol.130, n°1. 2006.

[11] CRINI N., BADOT P-M, Effets des sels de déneigement sur la végétation riveraine de l'Autoroute A39. INRA Université de Franche-Comté, Séminaire d'échange "Impacts des fondants routiers sur l'environnement", octobre 2006.

[11] DELISLE-THIBEAULT G.. Effets toxiques de l'utilisation des sels de voiries au Canada sur les amphibiens. Faculté des sciences de la terre, EVS 4904. Université d'Ottawa. 2009.

[12] ENVIRONNEMENT CANADA ET SANTE CANADA. Liste des substances d'intérêt prioritaire. *Rapport d'évaluation*. Sels de voirie. 2001.

[13] ENVIRONNEMENT CANADA. Code de pratique pour la gestion environnementale des sels de voirie, Avril 2004. Rapport SPE 1/CC/5.

[14] ENVIRONNEMENT CANADA. Guide to assist organizations in identifying areas potentially vulnerable to road salts in Canada. Projet n° 1005729. 103pp. 2006

[15] ENVIRONNEMENT CANADA. Loi canadienne sur la protection de l'Environnement (1999). Liste des substances d'intérêt prioritaire - *Rapport d'évaluation* - Sels de voirie.

[16] ENVIRONNEMENT CANADA. Problem formulation for the environnemental assessment of the priority substance road salts. Version préliminaire 47 p. 1997.

[17] EVANS, M. & FRICK,2002, « The effects of road salts on aquatic ecosystems » Environnement Canada, Institut national de recherche sur les eaux, Burlington/Saskatoon, collection de l'INRE n°02-308.

[18] INRS,. *Fiche toxicologique n°195* : Hexacyanoferrate (3^-) et Hexacyanoferrate (4^-) de potassium. Cahier des notes documentaires 1987, n°114.

[19] JACQUOT, E., LIVET J. Stockage de fondants routiers - Enquête sur les conditions de stockage - *Rapport 1 - analyse générale, rapport LRPC Nancy pour le compte du SETRA* – Dossier 200064028. 2001

[20] JONES, P.H., B.A. JEFFREY, P.K. WALTER and H. HUTCHON. Environmental impact of road salting - State of the art. Research and development Branch, Ministry of Transportation and Communications, Ontario, RR 237, 53 p. 1986.

[21] KAPLAN, D.L., R. HARTENSTEIN, E.F. HEUHAUSER et M.R. MALECKI. Physicochemical requirements in the environment of the earthworm (*Eisenia Foetida*), *Soil Biol. Biochem*., 12: 347-352. 1980.

[22] KERSEY, P.D. And R.G. HOOTMAN. Deicing salt dispersion and effect on vegetation along highways. In : D'Itri, F.M. (Ed), Chemical deicers and the environment. Lewis publishers. pp.253-273. 1992.

[23] Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Nancy. Veille technologique années 1991/1992 - VH1- Matériaux. Dossier 92-0857, 139 p. 1992.

[24] LAURENT D., STAQUET F. Influence des sels de déneigement sur le choix de la réalisation d'un bassin d'orage routier. *Actes du colloque AIPCR* - Turin 27-30 mars 2006.

[25] LAUSECKER P.O. L'activité de viabilité hivernale et ses impacts environnementaux. Mai 2009. Synthèse pour le compte du conservatoire des sites lorrains et communication présentée au Pôle relais tourbière. Février 2009.

[26] LAUSECKER P.O., MAUDUIT C., LIVET J.. Elaboration d'une méthodologie d'estimation des impacts potentiels des fondants routiers sur l'environnement - Contribution au projet de coopération franco-québécoise sur le thème « fondants & environnement »*Rapport LRPC Nancy pour le compte du SETRA*. 2007.

[27] LAUSECKER P.O., MAUDUIT C., LIVET J.Vers un modèle d'extrapolation spatiale « Pression-Etat-Impact ». Approche méthodologique pour l'évaluation et la compréhension des niveaux d'impact provoqués par l'épandage des fondants routiers sur les hydrosystèmes continentaux. 2008.

[28] LIVET J, Intervention "Trente ans de démarches scientifiques, techniques et organisationnelles visant à répondre aux attentes sociétales en maîtrisant l'usage des fondants routiers".

Journée technique " L'intégration des contraintes environnementales dans l'exploitation hivernale des chaussées", 27 janvier 2009, LR de Nancy.

[29] LUMIS, G.P., HOFSTRA, G. HALL, R.. Sensitivity of roadside trees and shrubs to aerial drift of deicing salt. Hortscience, vol,8, n°6, p 475-477.1973.

[30] MARTINEAU, D. et S. LAIR.. Nécropsie, Centrecanadien coopératif de la santé de la faune,Saint-Hyacinthe (Québec) (rapport depathologie inédit no 95-1893). 1995.

[31] MAUDUIT, C., JACQUOT, E. & LIVET, J.Stockage de fondants routiers - *Rapport n°2 : Approche environnementale , rapport LRPC Nancy pour le compte du SETRA* - Dossier 200064028. 2003.

[32] MAUDUIT C., JULLIEN A., SHAHINAZ S. et LIVET J. Life cycle analysis - Energy consumptions assessment for winter maintenance operations. *Communication* présentée à ISAP, ZURICH, août 2008.

[33] Ministère de l'Écologie. Cahier d'habitats Espèces "Desman des Pyrénées (Galemys pyrenaicus) - 1301". http://natura2000.environnement.gouv.fr/interactif/redirectpdf.php?u=/habitats/pdf/tome7/1301.pdf

[34] Organisation de coopération et de développement économiques.,.Réduction de l'utilisation des fondants dans l'entretien hivernal. Paris, 136 p. 1989.

[35] SCHER O. Les bassins d'eau pluviale autoroutiers en région Méditerranéenne : Fonctionnement et Biodiversité. Evaluation de l'impact de la pollution routière sur les communautés animales. Thèse de l'Université de Provence – Aix-Marseille I. 2005. Téléchargeable à cette adresse : http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00109123/fr/

[36] Sétra. *Fiches techniques* -Viabilité hivernale - Approche globale. Janvier 2010.

[37] Sétra. *Guide technique*. Nomenclature de la loi sur l'Eau - application aux infrastructures routières. Juin 2004

[38] Sétra. *Guide technique (projet)* - Gestion des fondants routiers - Approche globale.

[39] Sétra, à l'étude. Guide d'achat des fondants routiers.

[40] Sétra. *Note d'information n°73* – La proximité des sols et des végétaux à proximité des routes – Les éléments traces métalliques. Décembre 2004.

[41] Sétra. *Note d'information n°81 (série Chaussées Dépendances)* - Choisir et maîtriser la qualité des fondants. Février 1994.

[42] Sétra. *Note d'information n°85* – Nomenclature de la loi sur l'Eau - application aux infrastructures routières – Adendum au guide. Juin 2008.

[43] SPECKLIN G., MATRAT. M. Développement durable et viabilité hivernale : Le cas des marchés de sel routiers en France.

[44] SUCOFF, E.. Effect of deicing salts on woordy vegetation along Minnesota roads. Tech. Bul. Minnesota Agricultural, vol,3. 1975.

[45] TRAINER, D.L. and L. KARSTAD. Salt poisoning in Wisconsin wildlife. *Journal of the American Veterinary Medical Association*, 1 : 14-17. 1960

[46] URBAIN Y., APRR. Impact de la viabilité hivernale sur le milieu récepteur : cas du ruisseau du Combet, en aval de l'autoroute A40. *Actes du colloque AIPCR* - Turin 27-30 mars 2006.

[47] VALCIN F.Fondants routiers et environnement : Etat des connaissances, proposition pour la maîtrise de l'impact des fondants sur l'environnement. *Rapport LRPC Nancy pour le compte du SETRA* - Dossier 996423. 1999

[48] WHITFORD J.. Guide to assist organizations in Identifying Areas Potentially Vulnerable to Roads Salts in Canada. Environnement Canada. 2006

Textes réglementaires

[49] Arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface

[50] Code de la santé publique. Articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38.

[51] Code de l'environnement. Articles L. 216-6, L. 432-2

[52] Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau..

[53] Directive 2004/35/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 avril 2004 sur la responsabilité environnementale en ce qui concerne la prévention et la réparation des dommages environnementaux. sur la responsabilité environnementale.

[54] Directive 2006/118/CE du Parlement européen et du Conseil du 12 décembre 2006, sur la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration.

[55] Loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et milieux aquatiques.

Rédacteurs :

Caroline MAUDUIT – LRPC Clermont-Ferrand
téléphone : 33 (0)4 73 42 10 63– télécopie : 33 (0)4 73 42 10 01
mél : caroline.mauduit@developpement-durable.gouv.fr

Christophe PINEAU – CETE de l'Ouest
téléphone : 33 (0)2 40 12 85 02 – télécopie : 33 (0)2 40 12 84 44
mél : christophe,pineau@developpement-durable.gouv.fr

Elise TRIELLI – Sétra
téléphone : 33 (0)1 46 11 31 37 – télécopie : 33 (0)1 45 36 82 37
mél : elise.trielli@developpement-durable.gouv.fr

Rélecteurs :

Cette note d'information a fait l'objet d'une relecture par :

Demba DIEDHIOU (Fne), Véronique DEBILLY (ONEMA), Patrick LANDROT (CEMAGREF), Amandine ORSINI (CGDD), Marc LANSIART (CGDD), Marc GIGLEUX (CETE de l'Est), Thomas THIEBAUD (Setra), Alain COSTILLE (DIT), Philippe DE GUIBERT (ADSTD), Jérôme LARIVE (DIT), Jérôme CAVAILHES (Sétra).

Renseignements techniques :

Elise TRIELLI – Sétra
téléphone : 33 (0)1 46 11 31 37 – télécopie : 33 (0)1 45 36 82 37
mél : elise.trielli@developpement-durable.gouv.fr

Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements

46, avenue Aristide Briand – BP 100 – 92225 Bagneux Cedex – France

téléphone : 33 (0)1 46 11 31 31 – télécopie : 33 (0)1 46 11 31 69

Document consultable et téléchargeable sur les sites web du Sétra :

- *Internet : http://www.setra.developpement-durable.gouv.fr*
- *Intranet (Réseau ministère) : http://intra.setra.i2*

Référence : 1109w – ISSN : 1250-8675

Le Sétra appartient au Réseau Scientifique et Technique du MEDDTL

